

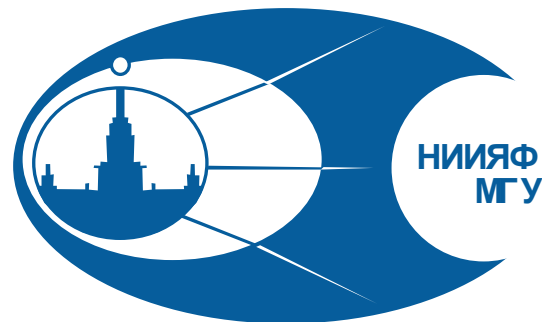
# Разработка электронных ускорителей для прикладных целей в НИИЯФ МГУ

В.И. Шведунов

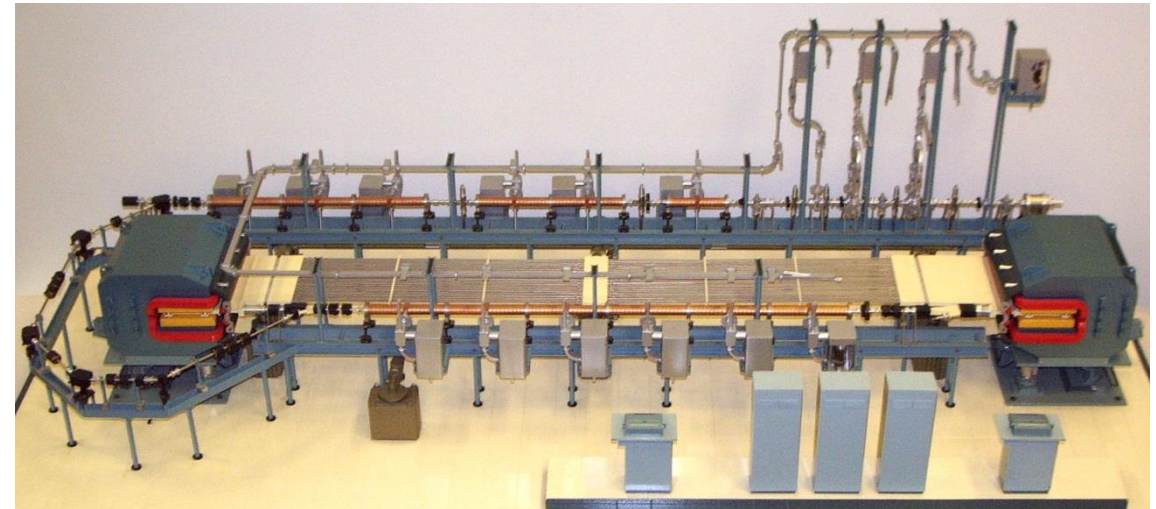
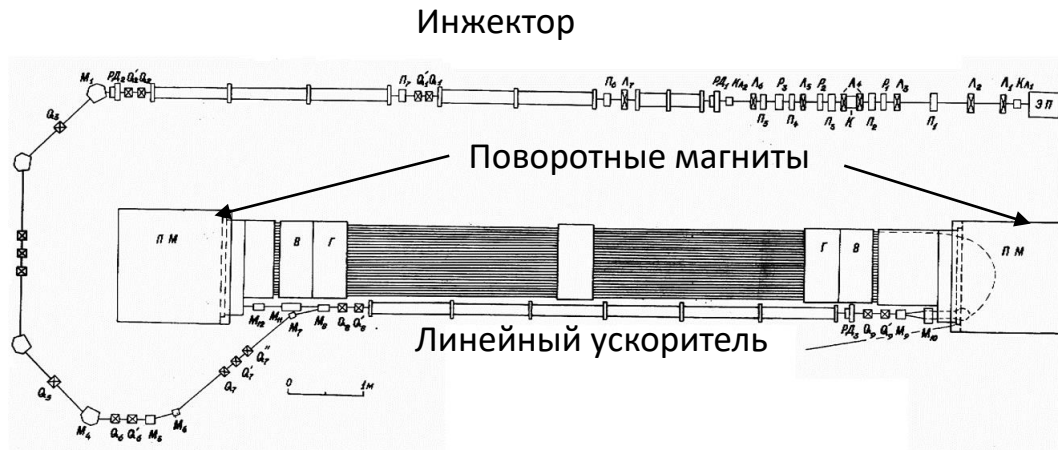
НИИЯФ МГУ

и

Лаборатория электронных ускорителей МГУ



## Разрезной микротрон непрерывного действия НИИЯФ МГУ (1983-1992 гг.)



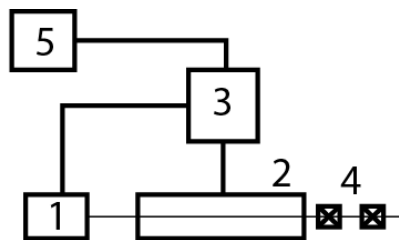
Энергия инжекции	6 MeV
Прирост энергии	6 MeV
Макс. энергия	175 MeV
Средний ток 100 $\mu$ A	
Рабочая частота	2450 MHz
Магнитное поле	1.027 T
Мощность клистрона	22 kW
Число клистронов	12+1

Сотрудничество с НПО "Торий", НПО "Исток", ФИАН, МИФИ, МРТИ, НИИЭФА, ОИЯИ, ЕрФИ, СГУ

В 1992-1995 гг. инжектор разрезного микротрона использовался для экспериментов по ядерной резонансной флюоресценции

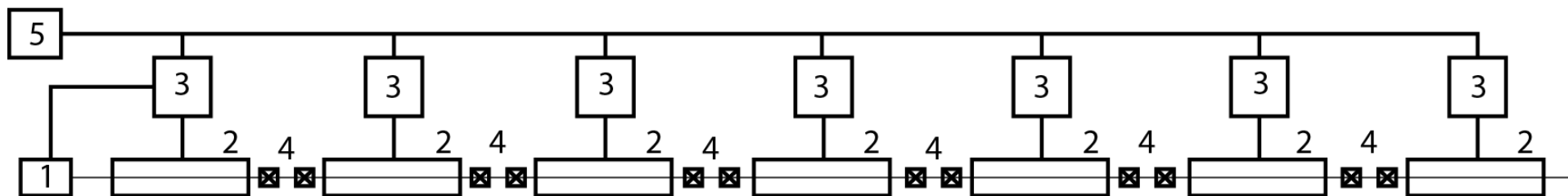
# Типы электронных ускорителей, разрабатываемых в НИИЯФ МГУ

- (a) Односекционный линак
- (b) Многосекционный линак
- (c) Разрезной микротрон



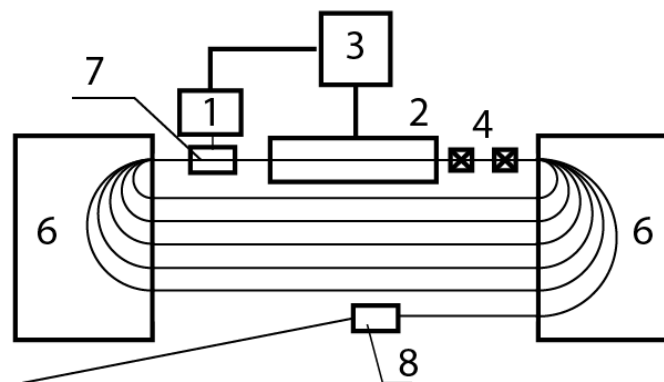
- (a) Низкая энергия, высокая мощность
- (b) Высокая энергия, высокая мощность
- (c) Высокая энергия, низкая мощность

(a)



(b)

- 1 – инжектор
- 2 – ускоряющая структура
- 3 – клистрон
- 4 – фокусировка
- 5 – задающий генератор
- 6 – поворотный магнит
- 7 – магнит инжекции
- 8 – магнит вывода

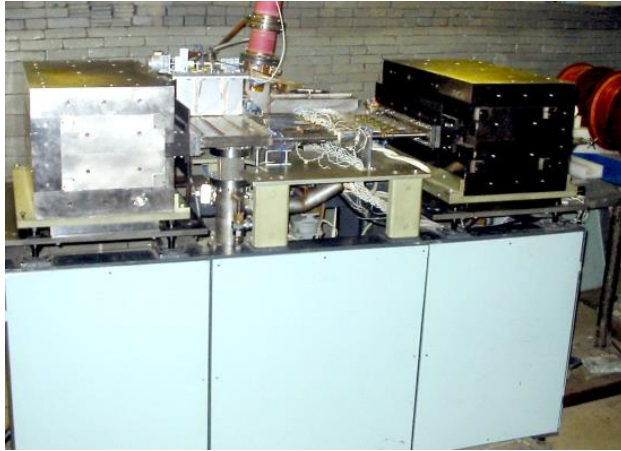


(c)

Рабочие частоты:  
 2450 МГц  
 2856 МГц  
 5712 МГц

Режимы работы:  
 непрерывный и  
 импульсный

# Электронные ускорители, разработанные в НИИЯФ МГУ в 1993 – 2009 гг. совместно с другими организациями



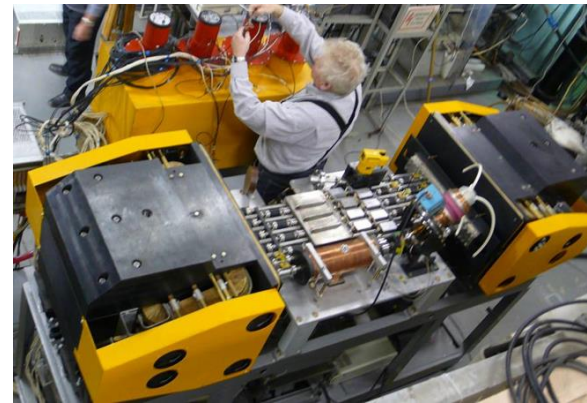
Импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ на редкоземельных постоянных магнитах с квадрупольной ВЧ фокусировкой.  
Для World Physics Technologies Inc. USA, 2003



Импульсный разрезной микротрон на энергию 35 МэВ с большой яркостью пучка с инъекцией от СВЧ пушки с фотокатодом.  
Для World Physics Technologies Inc. USA, 2004



Импульсный линейный ускоритель для радиационных технологий на энергию 10 МэВ.  
Совместно с ФГУП «НПП «Торий», 2007



Импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ.  
Совместно с ФИАН, 2009



Линейный ускоритель электронов непрерывного действия 1.2 МэВ/60 кВт.  
2001

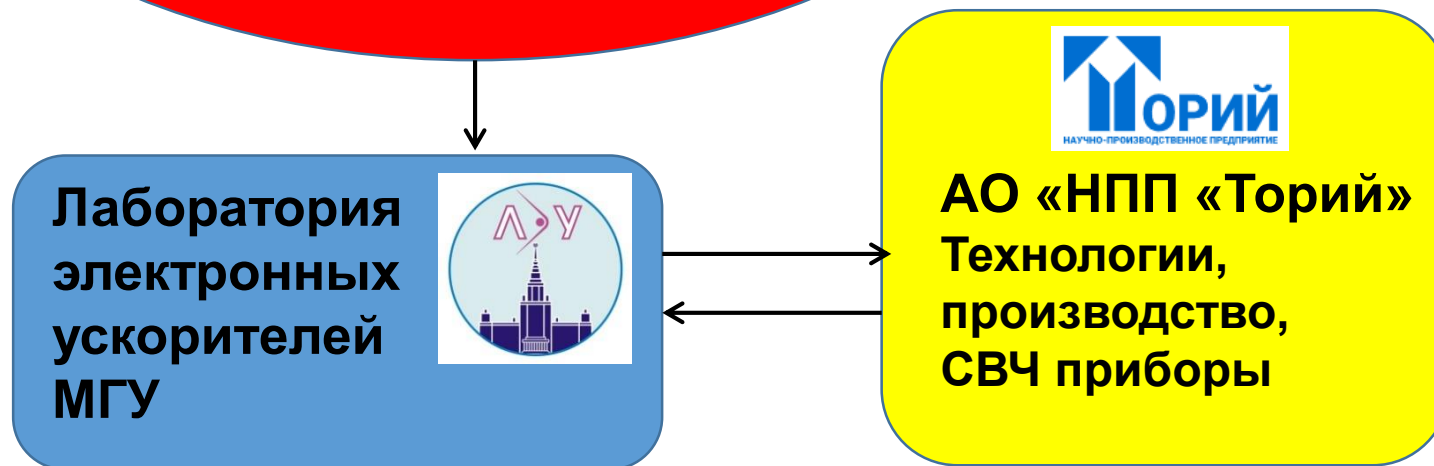
# Опыт НИИЯФ МГУ в области ускорительной физики и техники

1. Формирование прецизионных пучков электронов с малым поперечным и продольным эмиттансом.
2. Работа ускоряющих структур с низкой скважностью, вплоть до непрерывного режима в диапазоне длины волны 10-12 см.
3. Разработка рециркуляционных ускорителей - разрезных микротронов, линейных ускорителей с магнитным зеркалом.
4. Использование редкоземельного магнитного материала в конструкции сложных прецизионных магнитных систем с высоким уровнем поля для ускорителей электронов в диапазоне энергий до 100 МэВ.
5. Использование автоколебательных систем СВЧ питания в непрерывном и импульсном режимах диапазоне длины волны 10-12 см.
6. Оригинальные методики расчета линейных ускорителей с высокими группировочными и фокусирующими свойствами и разрезных микротронов.
7. Цифровые системы контроля и управления ускорителями на основе специализированных контроллеров.
8. Разнообразные методы диагностики ускоренного пучка.

В июне 2013 г. на базе Отдела ЭПВАЯ НИИЯФ МГУ создана  
Лаборатория электронных  
ускорителей МГУ (ФЗ 217)



Цель - практическое  
применение  
результатов  
интеллектуальной  
деятельности



**К настоящему времени ЛЭУ МГУ разработала и совместно с АО «НПП «Торий» поставила заказчикам следующие электронные ускорители:**

- Радиография	6
- Стационарные ИДК	10
- Мобильные ИДК	13
- Железнодорожные ИДК	3
- Стерилизация	1

---

**Всего: 33**

# Ускорители для радиографии



Излучатель с модулятором

Максимальная энергия

6, 8, 10 МэВ

Диапазон регулирования энергии

3-10 МэВ

Макс. мощность дозы на 1 м 6/8/10 МэВ

8/10/40 Гр/мин

Размер пучка на мишени

<1 мм



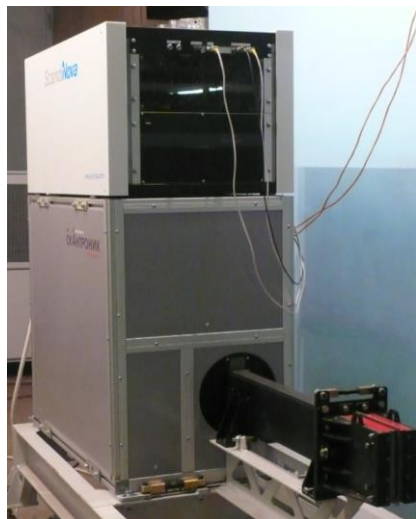
Панель управления



# Работа ускорителей на предприятиях Росатома



# Электронные ускорители с поимпульсным переключением энергии для инспекционно-досмотровых комплексов



Стационарный



Мобильный



Железнодорожный

КИУ-168



КИУ-271

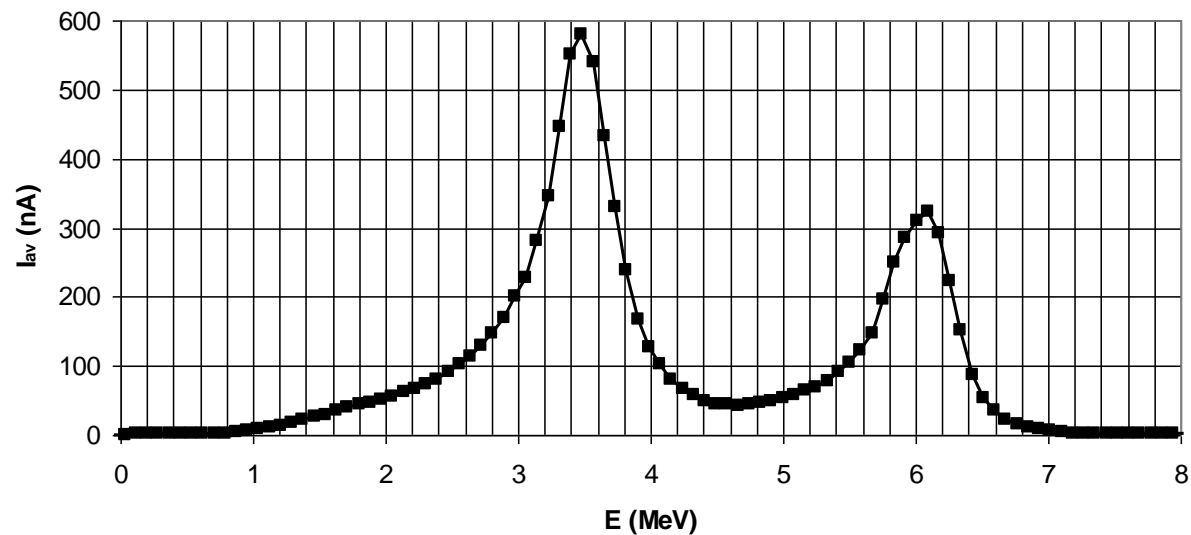


Энергия  
Стабильность энергии  
Мощность дозы, до  
Частота следования имп., до

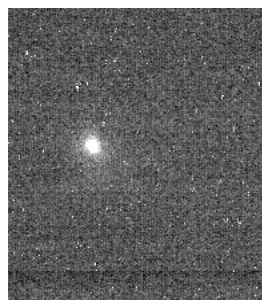
3.5/6 МэВ  
0.3%  
10 Гр/мин  
2 kHz

Клистроны и ускоряющие системы для S- и C- диапазонов

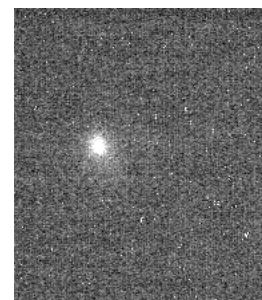
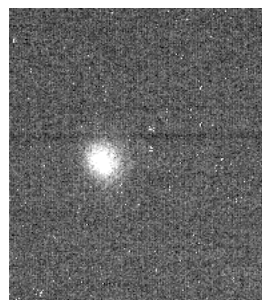
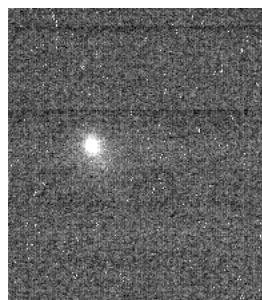
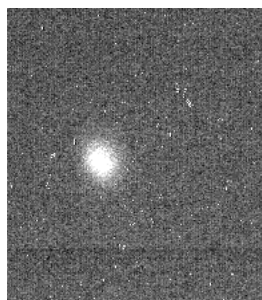
# Энергетический спектр в режиме переключения энергии



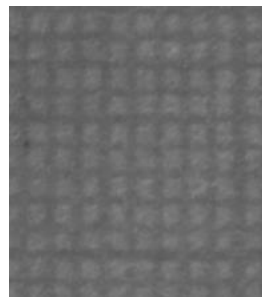
Низкая



Высокая

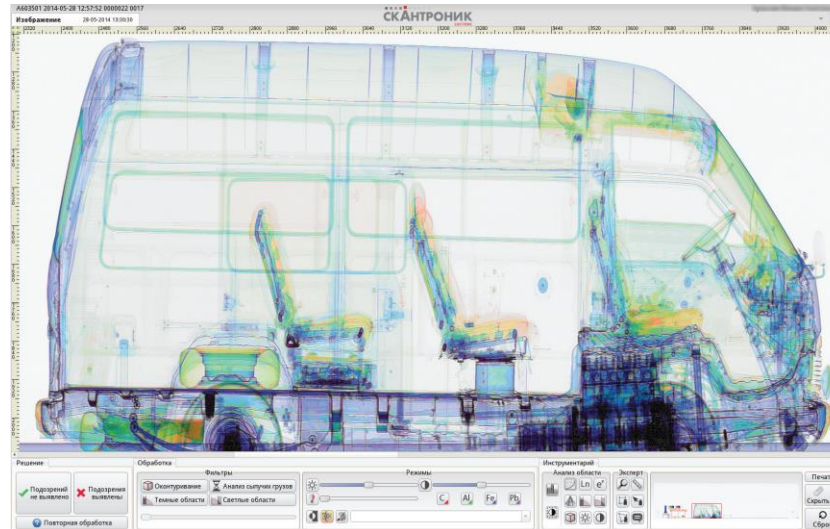


**Пятно пучка в области  
тормозной мишени**



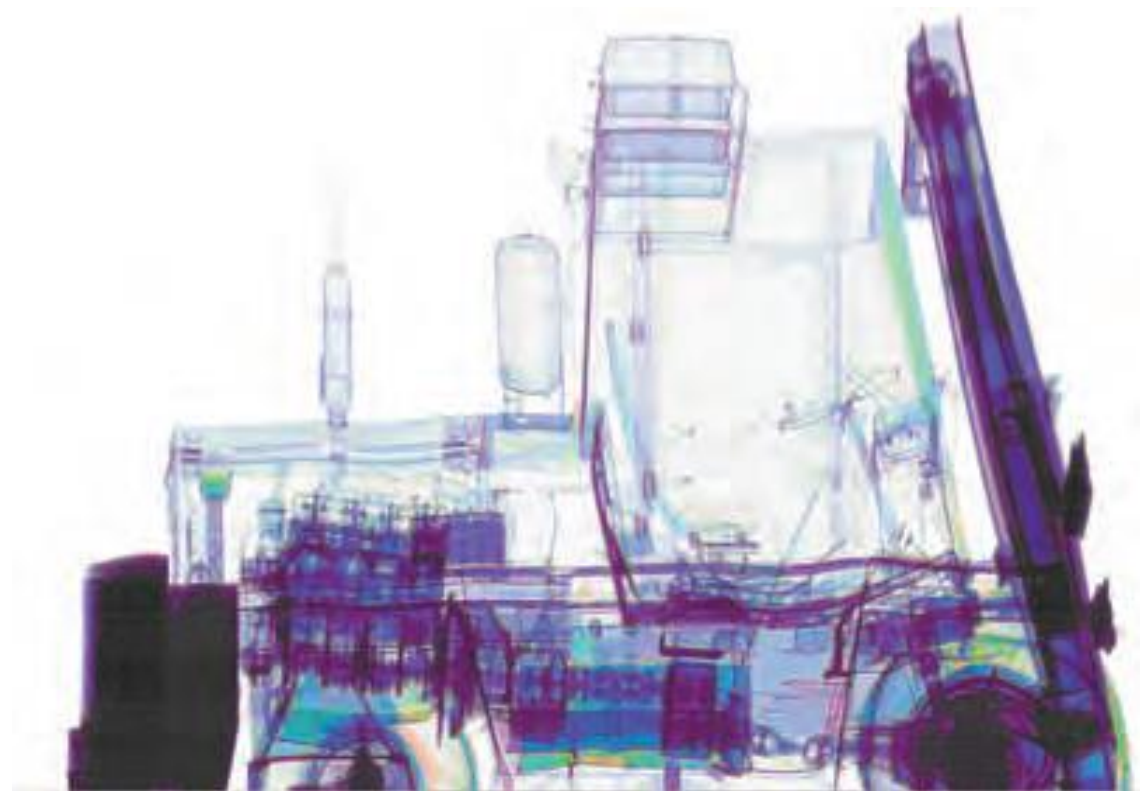
Масштаб:  
1 клетка =  
1×1 мм

# Стационарный ИДК СТ-6035 «Скантроник Системс»



[http://www.scantronicsystems.com/st6035\\_ru/](http://www.scantronicsystems.com/st6035_ru/)

# Мобильные ИДК СТ-2630М «Скантроник Системс»



[http://www.scantronicsystems.com/st-2630m-1\\_rus\\_final\\_pdf/](http://www.scantronicsystems.com/st-2630m-1_rus_final_pdf/)

# Железнодорожный ИДК СТ-2630Т «Скантроник Системс»



[http://www.scantronicsystems.com/st2630t\\_ru/](http://www.scantronicsystems.com/st2630t_ru/)

# Импульсный линейный ускоритель на энергию 10 МэВ



Ускоряющая система

Главной особенностью ускорителя является возможность варьирования параметра выходного пучка в широких пределах в зависимости от обрабатываемого продукта, что обеспечивает высокую эффективность использования мощности пучка, возможность работы с низкими и высокими дозами, сообщаемыми продукту. Параметры работы ускорителя устанавливаются автоматически в соответствии со спецификацией продукта.



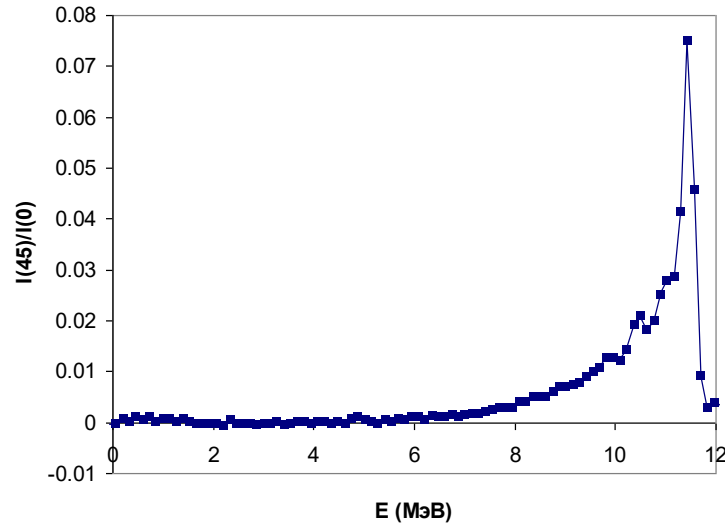
Клистрон и модулятор



Система контроля и источники питания

Энергия пучка	5 - 10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Длительность импульса	4 – 12 мкс
Частота следования имп.	50 – 400 Гц
Средняя мощность пучка	1 - 15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Длина структуры	1.24 м
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
КПД от розетки	20%
Ширина сканирования	40 - 80 см
Частота сканирования	1 – 30 Гц

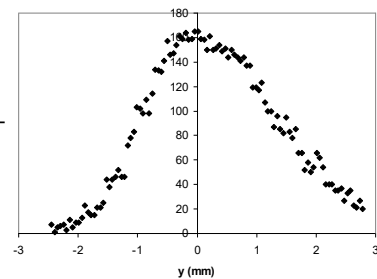
# Характеристики пучка ускорителя на 10 МэВ



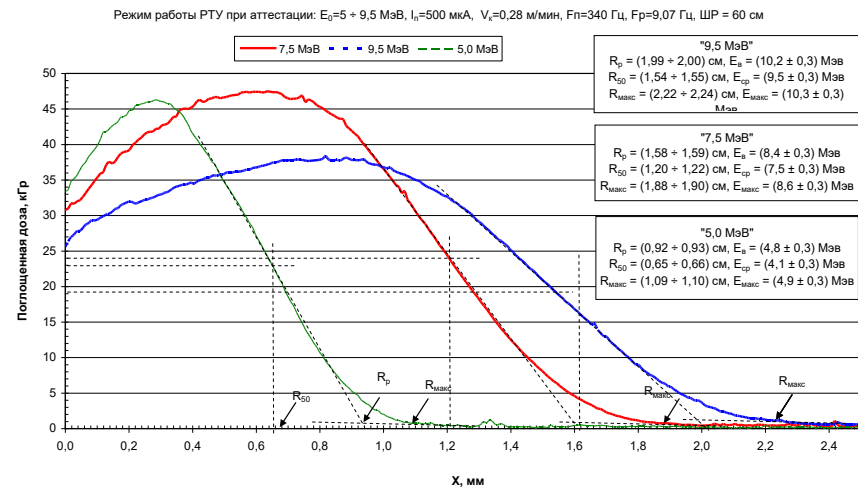
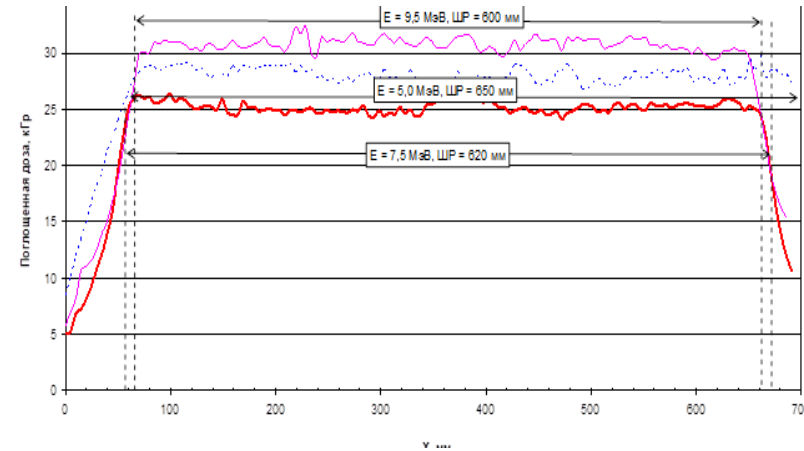
Энергетический спектр



Пятно пучка на выходе структуры



Поперечное распределение дозы для ширины развертки 60 см и энергий пучка 5, 7.5 и 9.5 МэВ



Распределение дозы по глубине в Al для 5, 7.5 и 9.5 МэВ



# Центр антимикробной обработки продукции компании Теклеор (Калужская область)



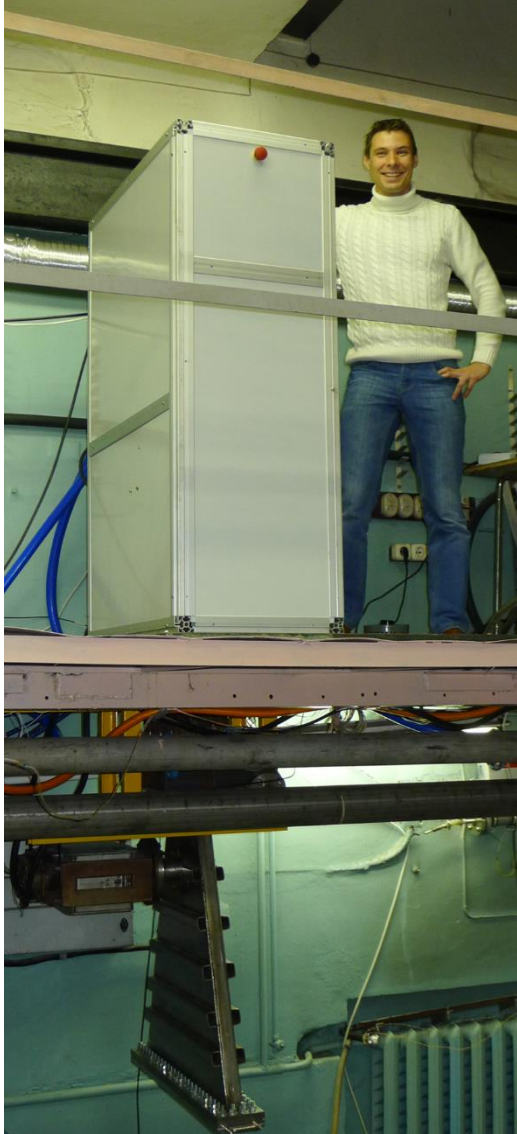
**Оборудование ускорителя**



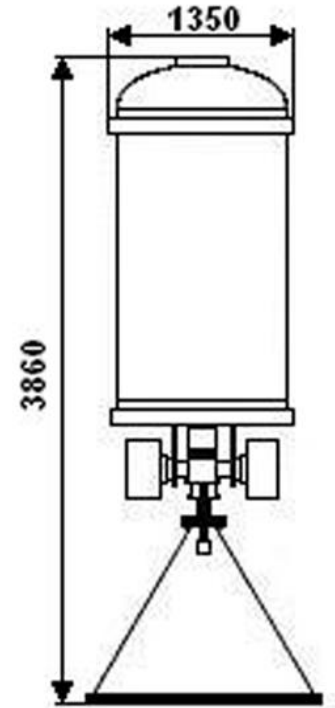
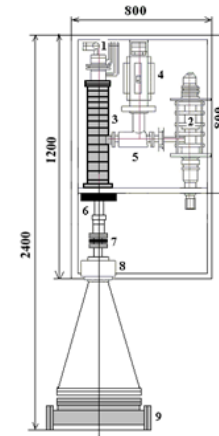
**Здание центра**

<https://www.tecleor.com/en/>

# Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ



Сравнение с ускорителем прямого действия

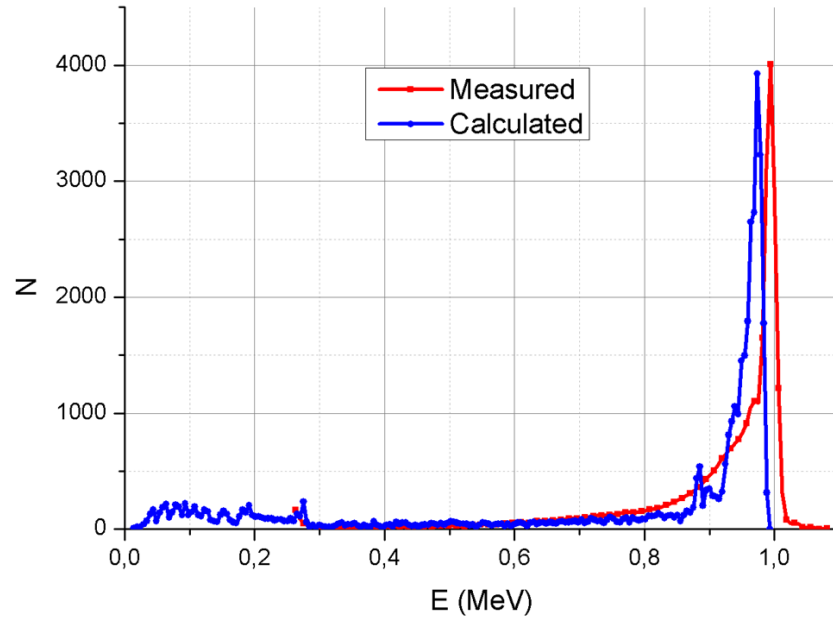


Энергия пучка	1 MeV
Средний ток пучка, max	25 mA
Средняя мощность пучка, max	25 kW
Рабочая частота	2450 MHz
Средняя мощность клистрона	50 kW
КПД от розетки	30%
Ширина развертки	80 cm
Размеры ускорителя	470 x 784 x 1375 mm <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Без развертки и источника питания

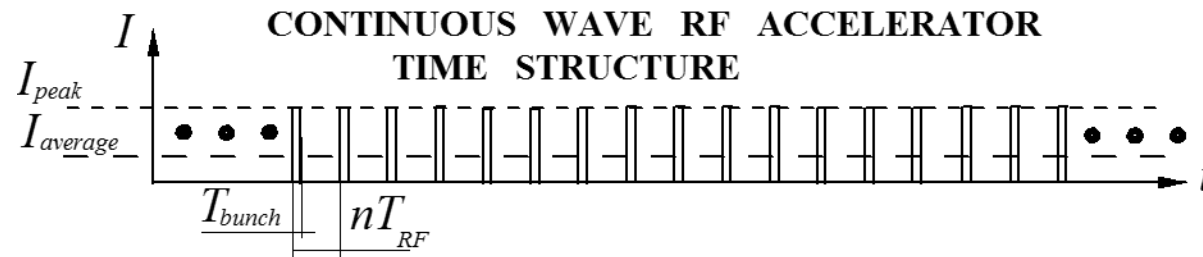
# Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ

## Энергетический спектр



Пробег в воде около 5 мм, в кремнии около 1.6 мм

Ток пучка может регулироваться в пределах 4-х порядков величины от микроампер до 25 мА.

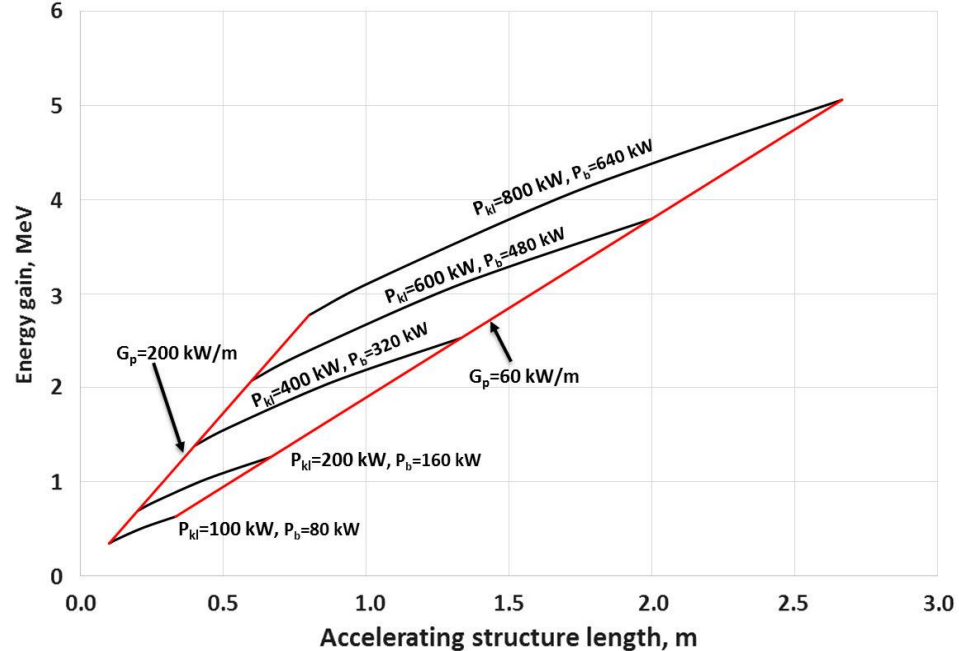


Непрерывная последовательность сгустков длительностью около 30 пс с интервалом 405 пс.

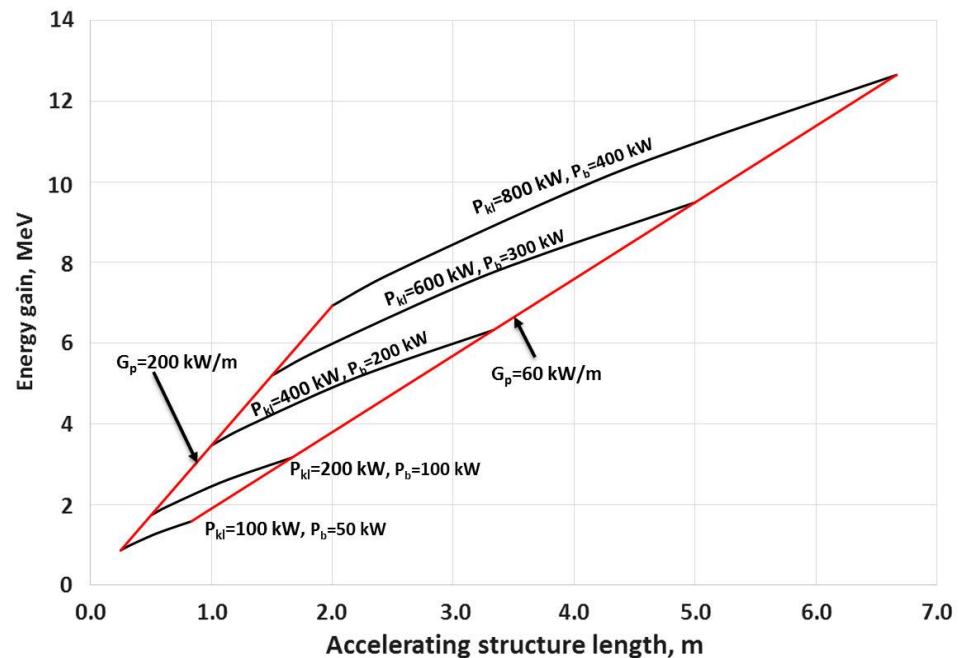
# Перспективные ускорители непрерывного действия

Соотношение между длиной  
ускоряющей структуры и энергией пучка  
для различных значений мощности  
клистрона и темпа набора энергии.  
Электронный КПД (а) 80%, (б) 50%.

Ведется разработка ускорителя на базе  
клистрона мощностью 200 кВт. Энергия  
пучка 1 – 3 МэВ, мощность пучка 160 –  
100 кВт.



(a)



(b)

# Комплекс лучевой терапии КЛТ 6

Разработку линейного ускорителя ведет ЛЭУ МГУ по контракту с НИИТФА (Росатом)

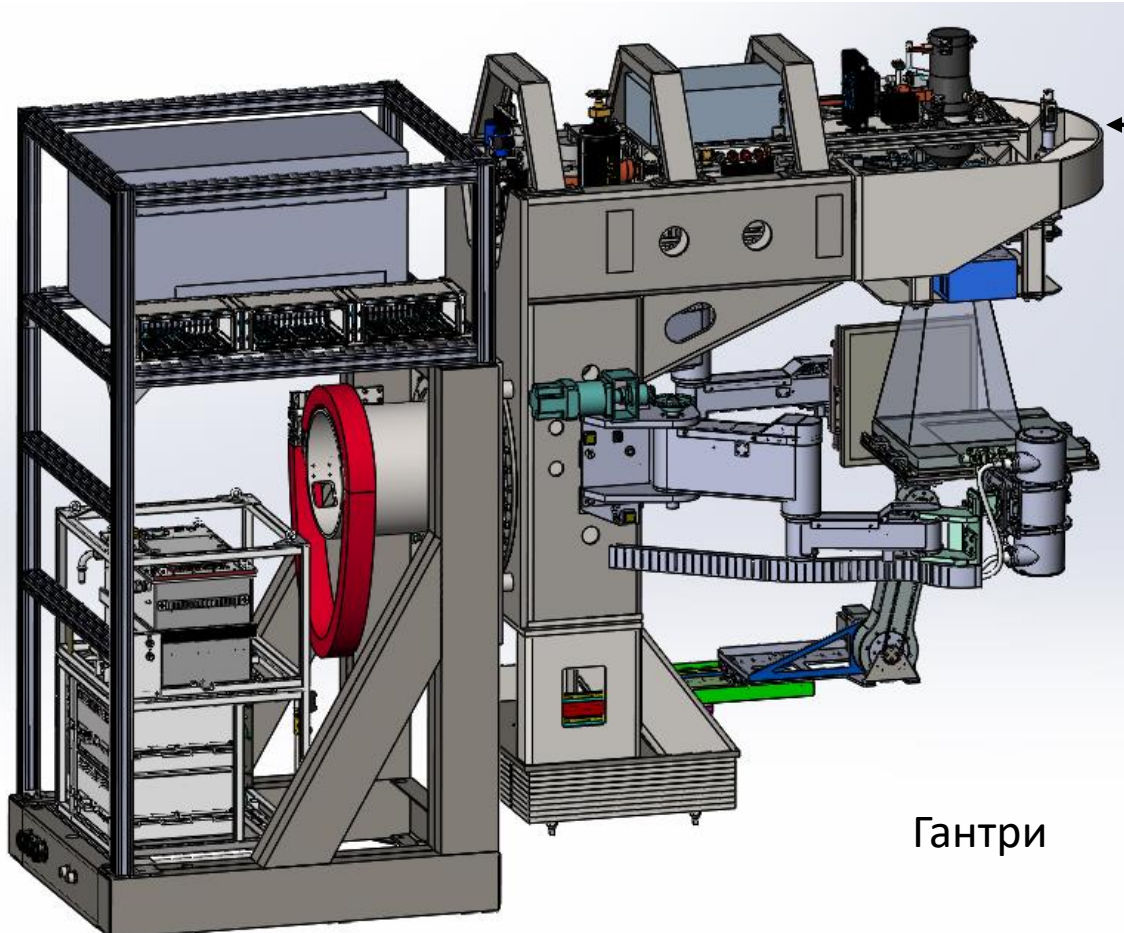
Параметры ускорителя

Энергия пучка

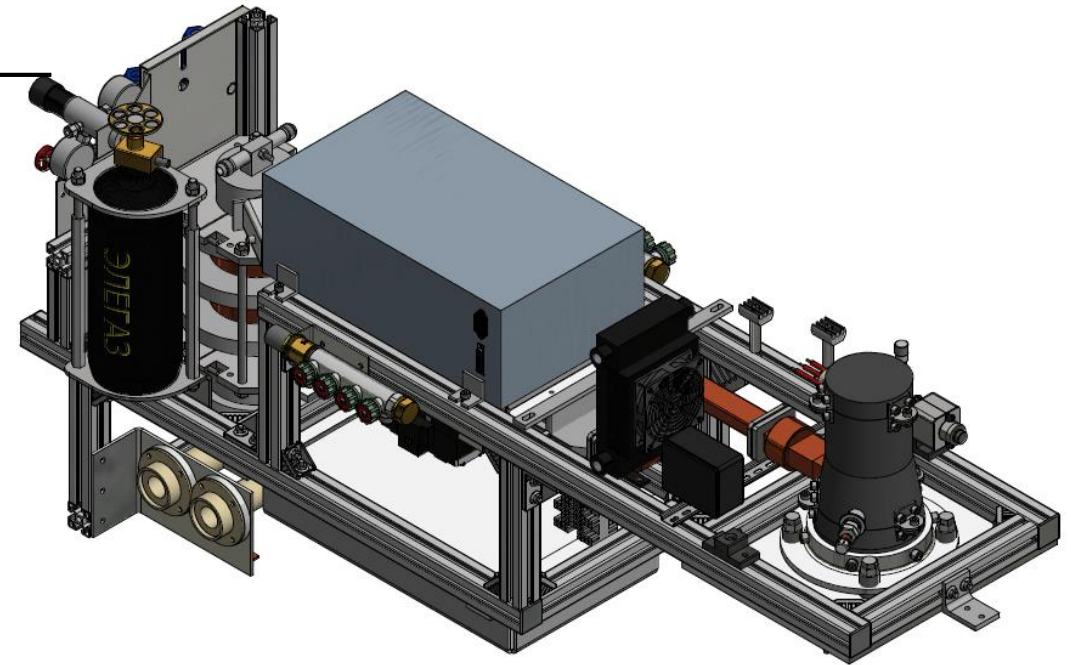
2.5/6 МэВ

Мощность дозы

10 Гр/мин



Гантри



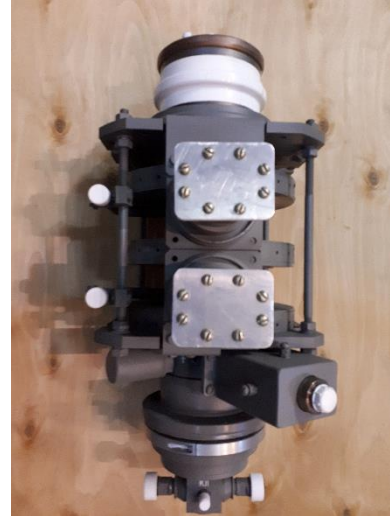
Ускоритель

Грант министерства образования и науки РФ # RFMEFI58217X0011

# Ускоритель комплекса лучевой терапии КЛТ 6



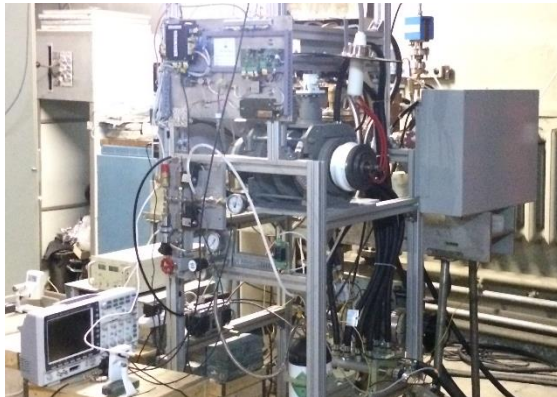
Ускоряющие системы С-диапазона на энергию 6 МэВ



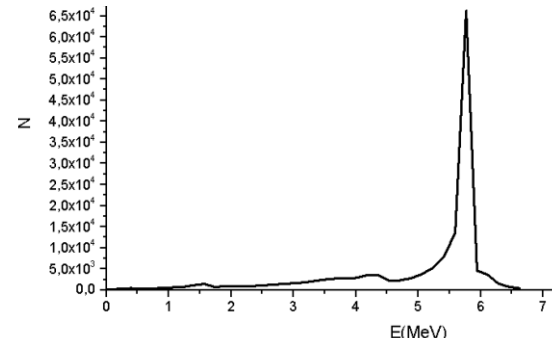
Клистрон С-диапазона на мощность 3.6 МВт



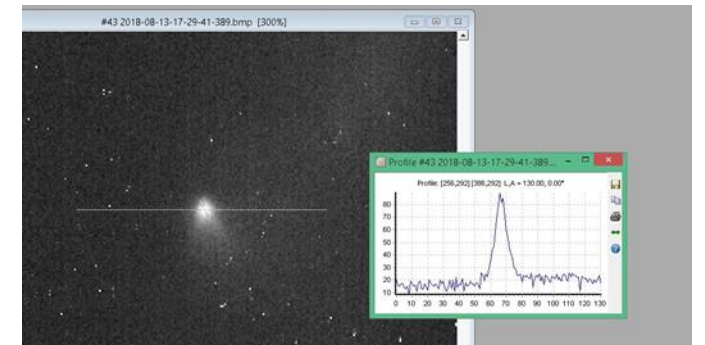
Радиационная защита



Испытательный стенд

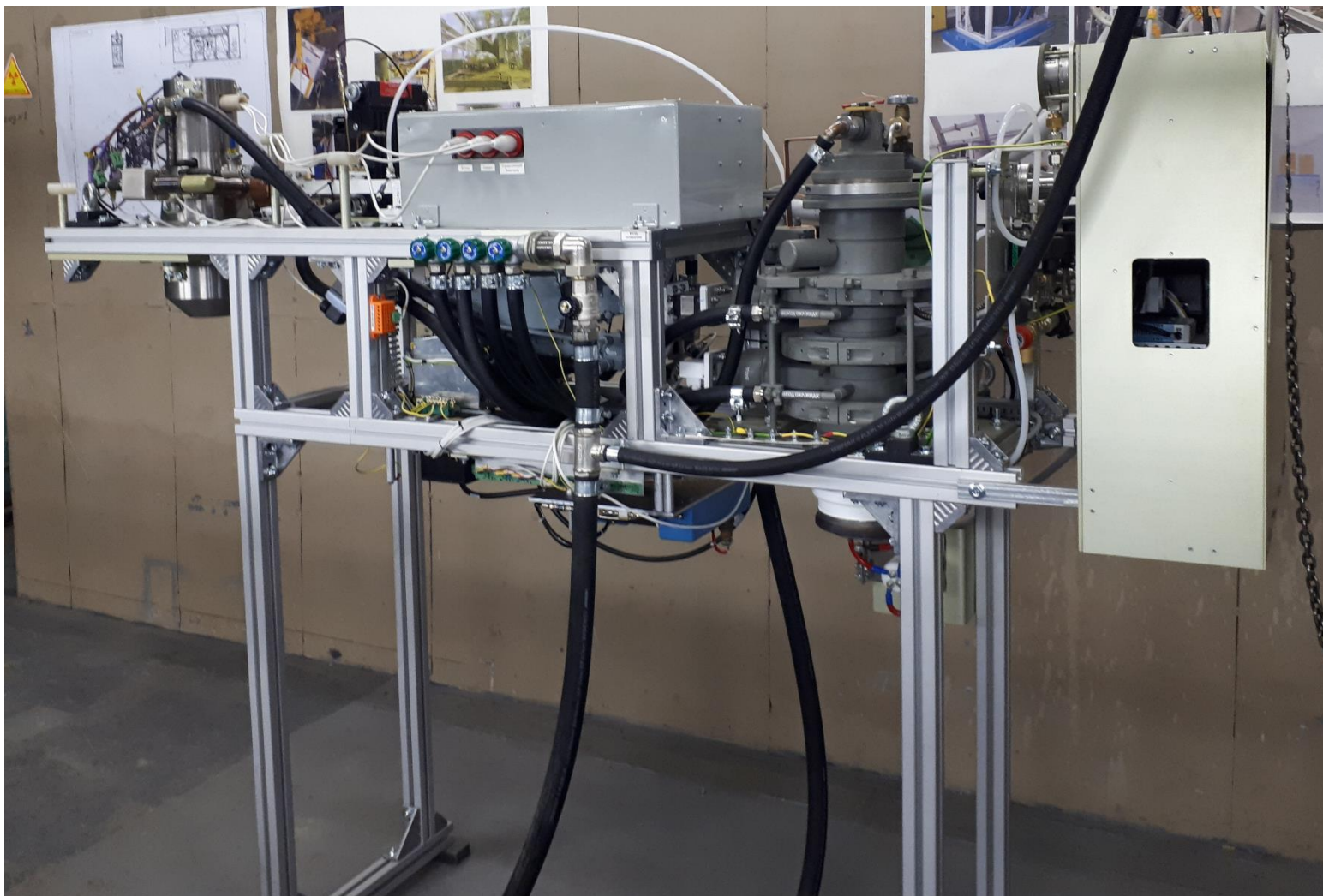


Измеренный энергетический спектр



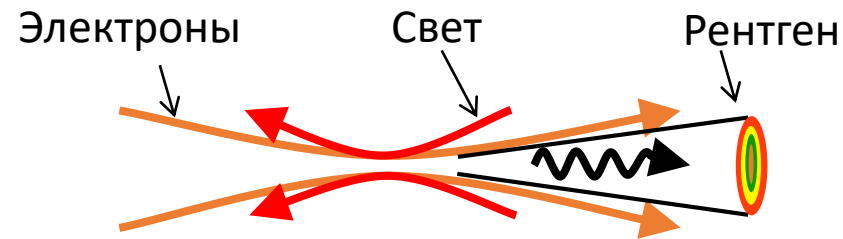
Пятно пучка

## Ускоритель комплекса лучевой терапии КЛТ 6



Грант министерства образования и науки РФ # RFMEFI58217X0011

# Проект лазерно-электронного генератора Инициатор – Лаборатория рентгеновской оптики ФИАН



$$E = 4\gamma^2 E_L, \quad \gamma = E_e / mc^2$$

## Номинальные параметры исходного рентгеновского пучка

$\Delta E/E$	$1 \times 10^{-1}$
$E$	20 - 40 кэВ
Диаметр пучка, rms	20 - 40 мкм
Расходимость	< 15 мрад
Средний поток	$10^{12}$ фотонов/с

## Параметры рентгеновского излучения на образце по тз зпкпзчика

$\Delta E/E$	$0.7 - 1.5 \cdot 10^{-3}$
$E$	20 - 40 кэВ (регулируется)
Диаметр, rms	$\leq 5$ мкм
Расходимость	< 1 мрад
Средняя плотность потока	$\geq 10^{11}$ фотонов/(с·мм <sup>2</sup> )

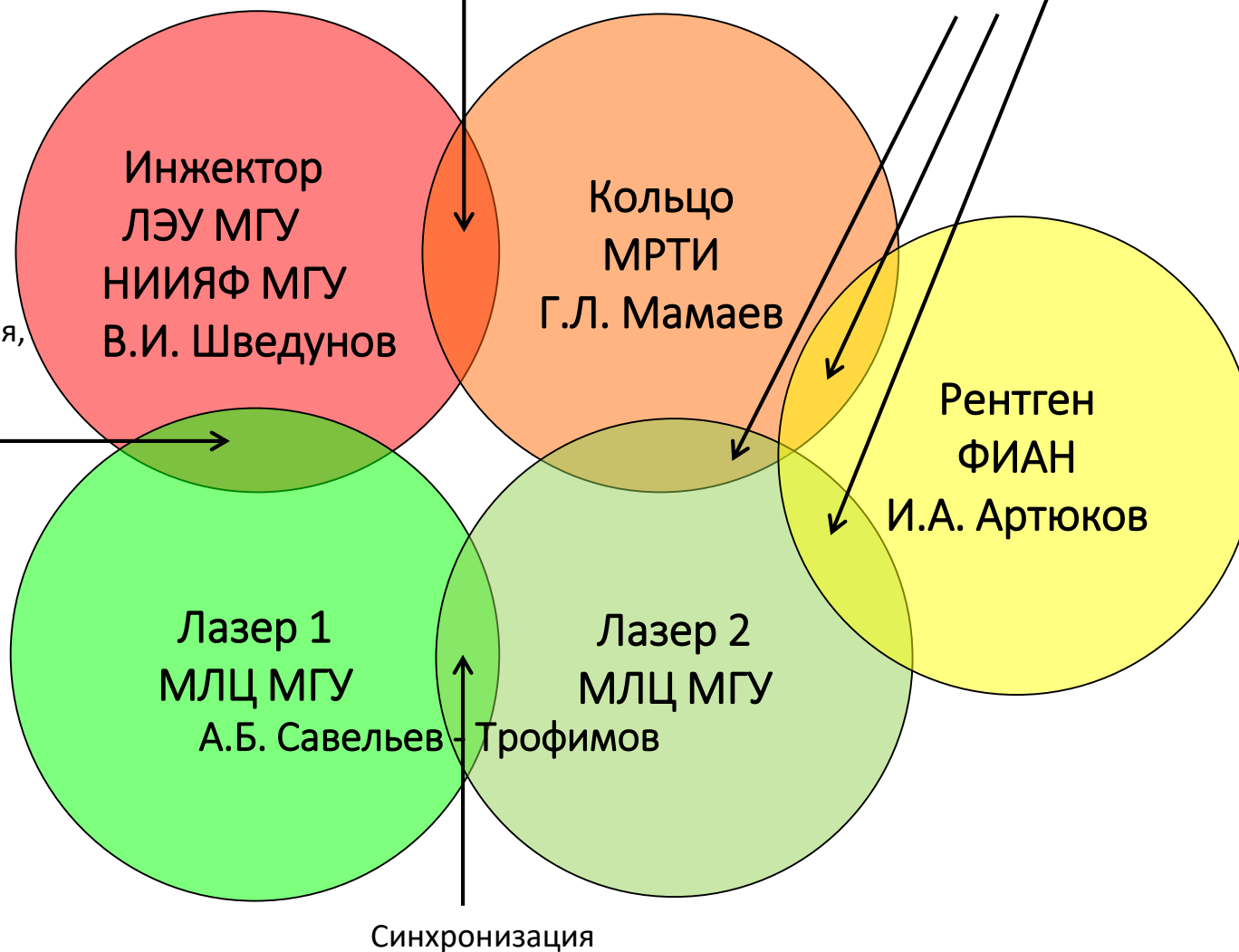


**В проектировании ЛЭГ  
принимали участие около 50  
человек. Выпущен полный  
комплект эскизной  
конструкторской  
документации**

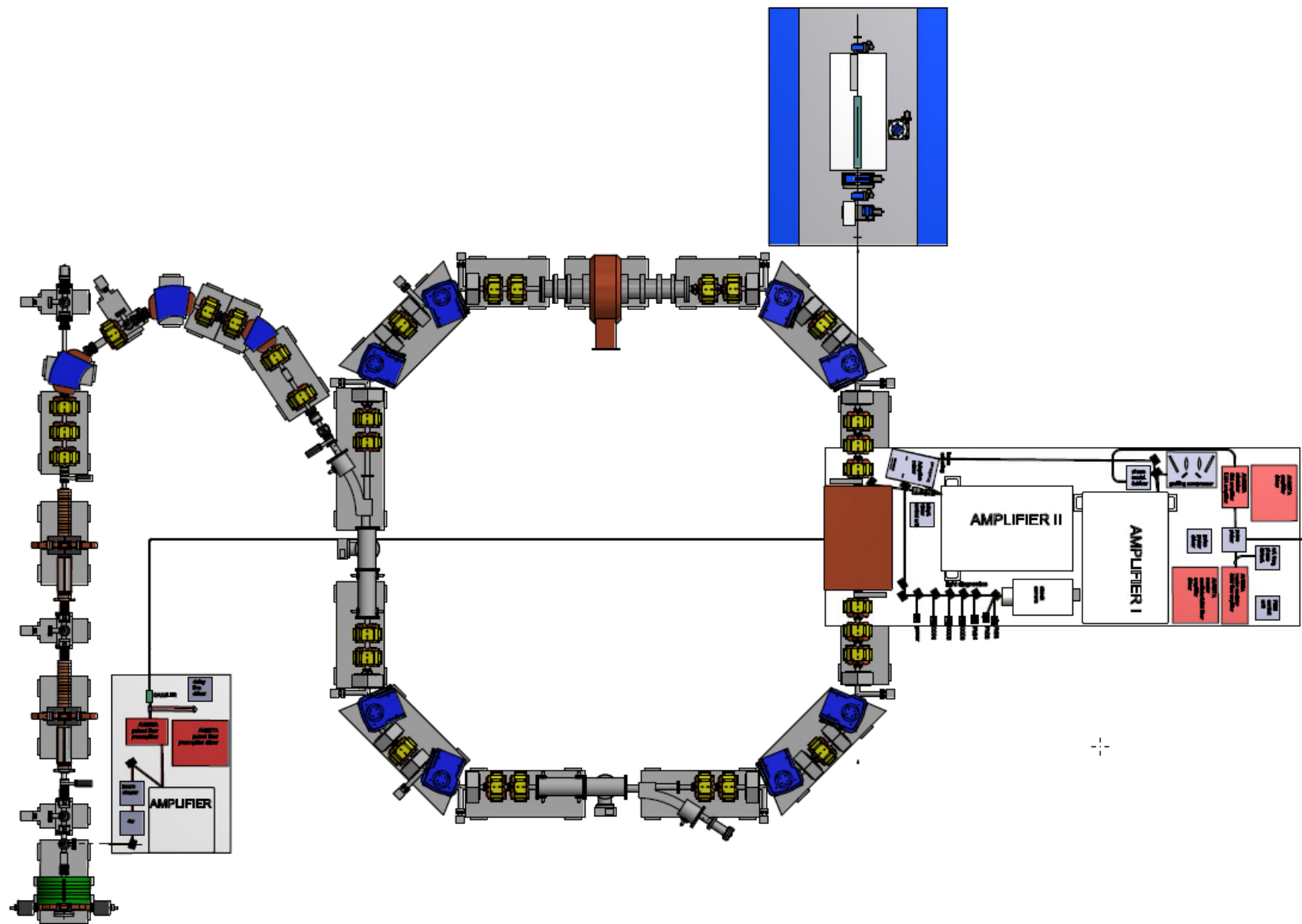
Форма и длительность  
импульса лазера, энергия,  
фаза, способ подачи на  
катод

Энергия, фаза инжекции,  
6D фазовый объем, септум-магнит,  
конструктивное объединение

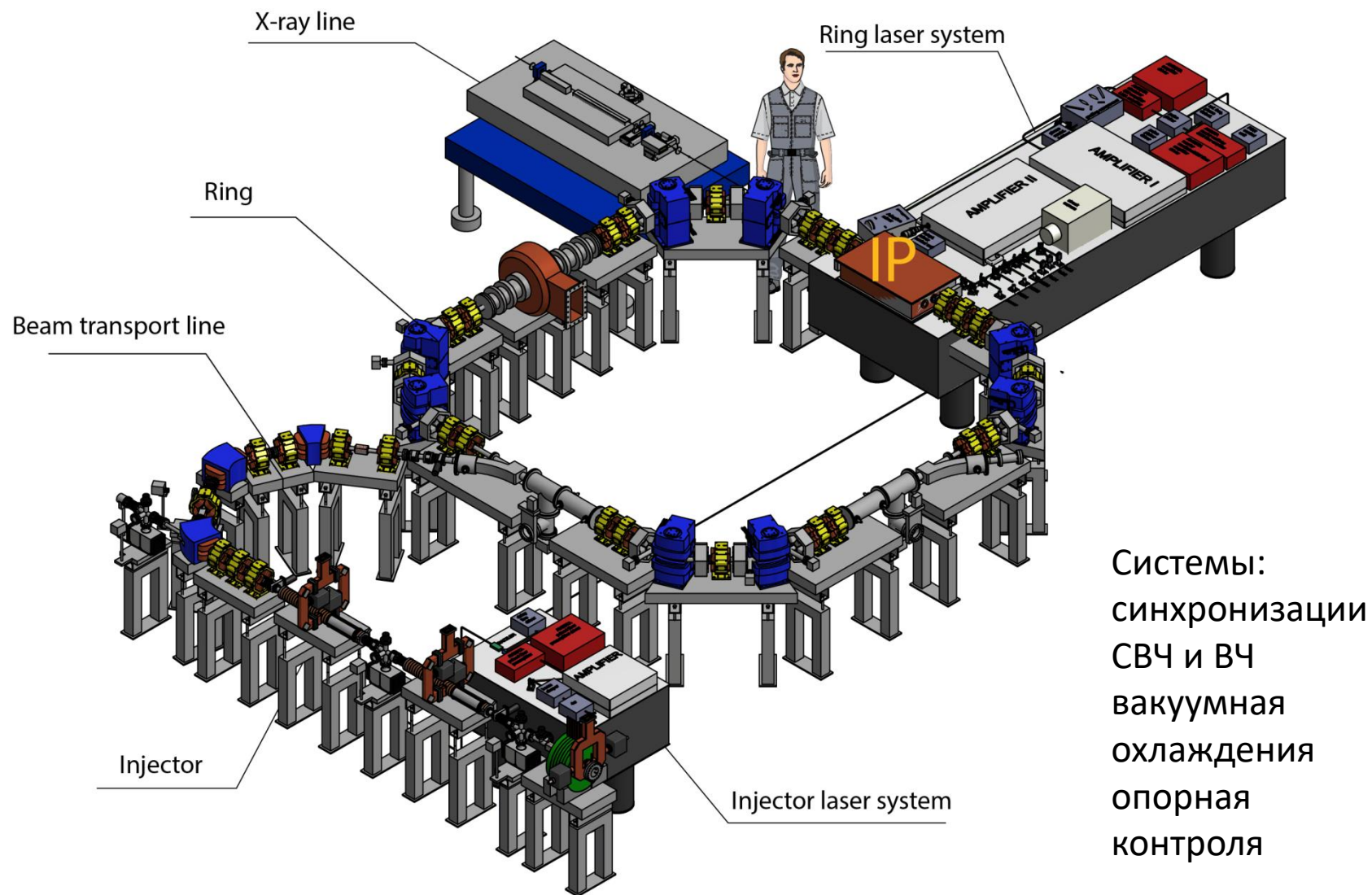
Поперечные и продольные  
размеры лазерного импульса и  
сгустка, совмещение в  
пространстве и времени,  
размещение резонатора и  
вывод рентгеновского пучка



# Общий вид ЛЭГ



# Общий вид ЛЭГ



**Спасибо за внимание!**